

## 論文の内容の要旨

論文題目 人と協調するパーソナルモビリティ・ビークルの運動と制御

氏名 中川 智皓

### 1. 序論

近年、環境保全や高齢社会への対応、移動権の確保の観点から、人と環境にやさしい新しい乗り物の開発が期待されている。従来の自動車交通や鉄道などの公共交通のみではカバーできない新たな交通モードの整備が求められてきている。そのような背景から、個人用の移動手段となる乗り物、パーソナルモビリティ・ビークル (Personal Mobility Vehicle, PMV) に関する研究、開発が増加してきている。しかし、その開発の多くは、コンセプト車両の提案で法規や社会インフラの観点から早期の実用化は困難なものや、製品開発したもの安定性や安全性の学術的な裏づけが十分とは言えない場合がある。特に、実社会への受容性のある PMV を提案するには、歩行空間など実環境における安全性を把握することは重要である。しかしながら、これらの点を考慮して、PMV の可能性を体系立てて議論された事例は見当たらない。そこで、本研究では、PMV について、運動力学、安定化制御、操縦性、乗員との協調性のみならず歩行者との親和性、社会における実用性の観点から議論する。新しい交通モードを実現する合理的な PMV を提案し、その有用性を示すとともに、PMV 全体についての体系化手法を構築する。本論文の流れとして、まず PMV として、2つの車輪を有する車両を取り上げ、

その力学特性を明らかにする。そのダイナミクスと社会における実用可能性を踏まえ、新たな交通モードを実現する PMV の形態を提案する。次に、提案する PMV の安定性を数値計算によって示し、操縦性を実験によって評価する。その後、PMV の歩行者との親和性を実験によって評価し、歩行空間で実現可能な PMV の指標を得る。最後に、得られた知見を元に、様々な PMV を多軸によって評価し、PMV の体系化を試みる。

## 2. 自転車の運動

PMV として、2 つの車輪を有する車両を取り上げ、そのダイナミクスを把握する。最も基本的な PMV として、自転車を取り上げ、その力学特性について論じる。コンパクトな PMV の提案のため、小径自転車に着目し、その運動力学解析について説明している。小径タイヤの領域では、安定性が著しく変化することを示し、小径自転車における安定性向上に効果的なパラメータを示している。小径自転車を用いた走行実験によって、シミュレーションの妥当性を示し、パラメータ設定による操縦安定性向上を確認している。

## 3. 極低速における自転車の安定化

前章より、自転車は特に低速で不安定であり、またタイヤを小径とするとさらに不安定となることが運動力学的に示された。しかし、歩行空間においても使用できる PMV という観点から、時には歩行速度以下での安定な走行を可能とする自転車、また歩行空間での占有体積が小さく持ち運びしやすい小径自転車の検討が必要と言える。そこで、極低速における自転車の安定化を図るため、前後輪の操舵を可能とする自転車に、前後輪の駆動力制御を付加することを考え、車体を安定化させる原理を示す。極低速時において、最も効率的に駆動力制御で安定化できる形態は、前後輪が共に 90 度操舵した形態、すなわち平行二輪車(倒立振り子型車両)となることを明らかにしている。

## 4. 新たな交通モードを実現する PMV の提案

新たな交通モードを実現する PMV の形態を提案する。ここでは、次の 3 点を理想的な形態要素とし、それらを考慮に入れた構造を考える。

- (1) 人と環境に優しい動力で、快適かつ効率的な近・中距離移動を実現する。
- (2) 歩道や施設内での歩行者混在環境で安全に使用されうる。
- (3) 公共交通や自動車に持ち込める可搬性がある。

これまでに示した 2 輪車両の力学を踏まえると、高速では直列二輪、低速では平行二輪の形態を用いることが、車両の持つ自己安定性の観点から合理的である。そこで、PMV として、自転車モードと平行二輪車モードという二形態を持ち合わせ、お互いのモードに変換可能で、状況に応じて使い分

けることができる乗り物を提案する。高速走行時には直列二輪である自転車モード、低速走行時には平行二輪車モードとなるハイブリッド方式を使用するコンセプトである。さらに、平行二輪車モードについては、従来の全電動型に加え、人力駆動型を提案している。それぞれの構造と動作方式を説明し、本研究で取り扱うシステムの範囲を述べている。次章以降では、それぞれのモードにおける安定化制御、操縦性について論じ、提案車両の成立の可否を示す。

#### 5. 自転車モードの安定化制御

提案した PMV の自転車モードにおける安定化制御について論じる。前後輪を共に操舵また駆動させる安定化制御を提案し、数値解析によって、従来の自転車よりも安定性を向上できることを示している。

#### 6. 平行二輪車モード（人力駆動型）における人との協調

提案した PMV の平行二輪車モード（人力駆動型）における人との協調を論じる。提案車両の構造は、ペダル式の平行二輪車とし、そのモデリングを行い、数値シミュレーションによって、人間のペダル駆動トルクの変動が安定化制御トルクに与える影響を論じている。ペダル式平行二輪車の機械式駆動と電気式駆動方式の比較において、人間の駆動力を一度バッテリーに蓄えて変動の小さいトルク指令でモータのみで駆動させる電気式駆動方式の方が、エネルギーを平滑化することが可能である点で、安定化しやすいことを示している。

#### 7. 平行二輪車モード（人力駆動型）の操縦実験

提案した PMV の平行二輪車モード（人力駆動型）を試作し、実験を行う。実験において、提案車両の成立可否を確認する。実験では、人力によるペダルの回転によって、前後の意図する方向に直進走行させること、ハンドルを回転させることによって、意図する方向に旋回させることに成功した。ペダルの回転によって、目標姿勢角を変化させる駆動制御、旋回運動のための車輪駆動トルクを操舵角、操舵角度に適切なゲインを乗ずることによって導出する操舵制御が、高い操縦性を有することを示している。

#### 8. 歩行者との親和性

歩行空間における PMV の受容性を検討するため、PMV が歩行空間に与える影響を、物理的、心理的側面から論じる。歩行者混在走行実験により、PMV が歩行者に与える不快感、恐怖感は、PMV の種類によって有意に異なるということを示している。コンパクトな倒立振り子型車両は、自転車に比べて、歩行者との親和性が有意に高いことが分かった。また、歩行者の心理

に負荷を与える PMV の要因をキーグラフ解析によって探索している。その結果を利用し、パーソナルスペース（他者の侵入によって心理的緊張が生じるスペース）を測定する試験設定を行った。PMV と歩行者の親和性をパーソナルスペース測定データに基づき評価している。これらから、車両の形態や速度の違いによって、親和性が変化することを合理的に導いている。

#### 9. PMV の多軸による評価

これまでに得られた PMV に関するダイナミクス、安定化制御、ドライバとのインタラクション、歩行者とのインタラクションの知見を元に、複数の軸によって PMV を評価する。PMV の安定性と車輪配置の関係をまとめ、低速では平行二輪車、中高速では自転車の形態となる車輪配置を有する PMV が、効率的に安定性を確保するための合理的な形態であることをまとめている。また、PMV に対する歩行者のパーソナルスペースと車両の体積の関係から、それぞれの PMV に対するパーソナルスペースを求める近似式を導出し、既存の PMV の位置づけを可視化している。さらに、これまでの実験結果に基づき、歩行者親和性を保持するための PMV の速度と歩行密度の関係を示している。これによって、歩行者にとって快適な PMV 混在環境を設計する一つの指針が得られる。PMV の走行に必要なエネルギーを試算し、省エネ性の観点から人力を用いた提案 PMV の優位性を示している。最後に、車両の操縦安定性、歩行者との親和性、社会における実用性によって、人と協調する PMV の形態について、体系化手法を構築している。3次元の体系図より、提案した PMV の位置づけを可視化し、その有用性を示した。

#### 10. 結論

本研究では、新たな交通モードを実現するための PMV の形態を、ダイナミクス、安定化制御、ドライバとのインタラクション、歩行者とのインタラクションの知見から、合理的に導いた。多軸による PMV の評価を行い、車両の操縦安定性、歩行者との親和性、社会における実用性によって、人と協調する PMV の形態を体系化する手法を構築した。